

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторної роботи

«Дослідження гетерогенно-каталітичного процесу, що лімітується зовніш-
ньою кінетикою»

з курсу «Загальна хімічна технологія»

для студентів хімічних спеціальностей усіх форм навчання

Затверджено
редакційно-видавничою
радою університету,
протокол № 1 від 20.03.2015 р.

Харків
НТУ «ХПІ»
2015

Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи «Дослідження гетерогенно-каталітичного процесу, що лімітується зовнішньою кінети-кою» з курсу «Загальна хімічна технологія» для студентів хімічних спеціальностей усіх форм навчання / Укл.: Ведь В.Є., Краснокутський Є.В., Мірошніченко Н.М., Кузнецова М.М., Пономаренко Г.В.– Харків: НТУ “ХПІ”, 2015.– 20 с.

Укладачі: В.Є. Ведь
Є.В. Краснокутський
Н. М. Мірошніченко
М.М. Кузнецова
Г.В. Пономаренко

Рецензент К.О. Горбунов

Кафедра інтегрованих технологій, процесів та апаратів

Вступ

Для підготовки інженерів – технологів широкого профілю велике значення приділяється вивченню дисципліни «Загальна хімічна технологія». У курсі «Загальна хімічна технологія» розглядаються хімічні виробництва з точки зору особливостей технологічних процесів, закономірностей вибору технологічного режиму, апаратного оформлення процесів, раціонального використання сировини та матеріалів, охорони навколишнього середовища.

Саме ці знання сприяють вмінню студентів застосовувати зазначені закономірності до аналізу стадій хіміко – технологічного процесу і створення оптимальних технологічних систем, виконання розрахунків і практичного використання отриманих знань у своїй професійній діяльності. Отримані знання з основних закономірностей хімічної технології необхідні для подальшого вивчення спецтехнологій.

Для кращого засвоєння і закріплення теоретичних положень основних розділів лекційного курсу передбачається виконання лабораторних робіт.

Метою даної роботи є дослідження гетерогенно-каталітичного процесу, що лімітується зовнішньою кінетикою, визначення спостережуваних значень енергії активації, передекспонентного множника та температури переходу з зонішньокінетичної у зовнішньодифузійну область.

Дані методичні рекомендації включають основні теоретичні відомості по темі роботи, опис стенду для виконання роботи, визначають порядок виконання роботи і розрахунків, обсяг і зміст звіту.

1. Основні теоретичні відомості

Речовини, що знаходяться у газовій фазі, та каталітично активні компоненти, що локалізовані на твердих носіях (металевих чи керамічних) знаходяться у різних фазах. Це визначає складність та багатостадійність перебігу процесу гетерогенно-каталітичної хімічної реакції.

До таких стадій відносяться процеси [1], пов'язані із дифузією початкових речовин із газового потоку до зовнішньої поверхні каталізатора; дифузія початкових продуктів у порах зерна каталізатора; адсорбція вихідних речовин на поверхні каталізатора; власне хімічне перетворення; десорбція продуктів хімічного перетворення з поверхні каталізатора; дифузія продуктів із внутрішньої поверхні зерна каталізатора до поверхні; дифузія продуктів з поверхні каталізатора у газовий потік.

Будь-яка з наведених стадій може контролювати процес. Таким чином, кінетичні закономірності гетерогенно-каталітичних процесів можуть контролюватися як законами власне хімічної кінетики, так і закономірностями масопереносу і законами адсорбції.

У зв'язку з цим виділяють п'ять основних кінетичних областей роботи гетерогенного каталізатора [1].

Зовнішньокінетична область, швидкість якої визначається власне хімічним перетворенням на зовнішній поверхні зерна каталізатора.

Адсорбційна область лімітується адсорбцією початкових речовин або десорбцією продуктів реакції.

Зовнішньодифузійна область характеризується тим, що найповільнішою стадією є дифузія початкових речовин із потоку до зовнішньої поверхні каталізатора або дифузія продуктів реакції від неї у потік.

Внутрішньодифузійна область визначається тим, що найбільш повільною є стадія дифузії початкових речовин від зовнішньої поверхні зерна каталізатора до його внутрішньої поверхні, або стадія дифузії продуктів реакції у зворотному напрямку.

Внутрішньокінетична область лімітується швидкістю хімічного перетворення, що перебігає на поверхні пор зерна каталізатора, тобто на його внутрішній поверхні.

Чіткі межі між цими областями роботи каталітичного перетворювача відсутні. Вони перекриваються проміжними перехідними областями, в яких одночасно проявляються закономірності різних областей.

Відомо також [2 – 4], що в умовах високих швидкостей газового потоку і високих температур, а також за умови відсутності структурної порушеності носія каталізатора, гетерогенно-каталітичний процес лімітується швидкістю дифузії початкових речовин із газового потоку до зовнішньої поверхні каталізатора або швидкістю дифузії продуктів реакції у зворотному напрямку. Це визначає необхідність дослідження процесів окиснення у зовнішньодифузійній та зовнішньокінетичній області, оскільки остання має безпосередній вплив на характер та особливості перебігу масообміну.

2. Стенд вивчення кінетичних і газодинамічних параметрів гетерогенно-каталітичних процесів

Стенд вивчення кінетичних і газодинамічних параметрів каталітичних процесів очищення газів функціонує наступним чином. Досліджуваний газ подається в змішувач 3 з балона 2. При необхідності газ змішується в змішувачі 3 разом з повітрям, нагнітається за допомогою компресора 1. Кількісний склад змішуються газів в змішувачі 3 задається співвідношенням швидкостей газових потоків. Використання в одній схемі можливості подачі газів, як з балонів, так і від компресора дозволяє отримувати кілька типів сумішей, наприклад, вуглеводень – повітря, азот – повітря, гелій – кисень, гелій – кисень – вуглеводень і т.д. Вентиллями регулюється задане співвідношення газів, що подаються в змішувач.

У разі необхідності дослідженні властивостей багатокомпонентного газу, один або кілька компонентів якого знаходяться в іншому агрегатному стані, передбачено поділ газового потоку на дві частини, що з'єднуються після проведення процесу збагачення однієї частини газу парами рідких або твердих сполук. При цьому певна частина газу направляється в змішувач 6, а задана частина в термостатувати посудину або випарник. У посудину поміщений рідкий вуглеводень, а у випарник навіс твердого органічної сполуки. Тверді органічні сполуки можуть бути використані або в розплавленому стані (передбачений барботаж через розплав газів вуглеводень,

азот або гелій). У разі якщо тверді з'єднання легко сублімується (наприклад, нафталін, саліцилова кислота, фенол), то їх поміщають в обігрівачі 6 і надходять у реактор 7.

Стенд для лабораторних досліджень перебігу гетерогенно-каталітичних процесів оснащений датчиками для знімання термометричної інформації, визначення тиску, витрат газів. У конструкції стенду передбачені точки контролю температур за допомогою термопар гр. ТХА діаметром 0.1 мм, вимір і регулювання температури здійснюється восьмиканальним приладом РТЭ-4.8. Вимірювання, контроль і регулювання витрат газів здійснюється реометр і ротаметрами. Регулювання витрат газів здійснюється за допомогою регулювальних вентилів. Тиск, що створюється шаром каталізатора, вимірюється за допомогою U-подібного манометра.

Для підтримки необхідного температурного режиму проведення каталітичних процесів в ізотермічному або адіабатичному режимах в реакторі, в апаратурне оформлення стенду включені восьмиканальний прилад РТЭ-4.8, який регулює зв'язок між термоприймачами і системою нагріву реактора.

Якісний і кількісний склад газів, що входять і виходять з реактора, визначається за допомогою газоаналізаторів Инфракар 5М-2.02 та ОК-СИ 5М-5.

Основні параметри функціонування стенду виводяться в реальному масштабі часу на ЕОМ (на схемі установки за рис. 1 не вказано).

У вузлі 7 рис. 1, позначеному як обігрівний теплоізований реактор, залежно від цілей проведених досліджень розміщували реактори різних конструкцій, наприклад, проточні або безградієнтний.

На рис. 2 наведена схема проточного реактора диференціального типу, конструкція якого відзначається зручністю його обслуговування, можливістю створення заданого теплового режиму і забезпечена теплоізоляцією та можливістю охолодження. У конструкції реактора передбачені штуцери для завантаження каталізатора, введення і виведення газу 1 і 3. Вісім пробовідбірників 2 рівномірно розташовані по довжині реактора. Пробовідбірники призначені для розміщення в них термопар і служать каналами для відбору проб газу по довжині реактора.

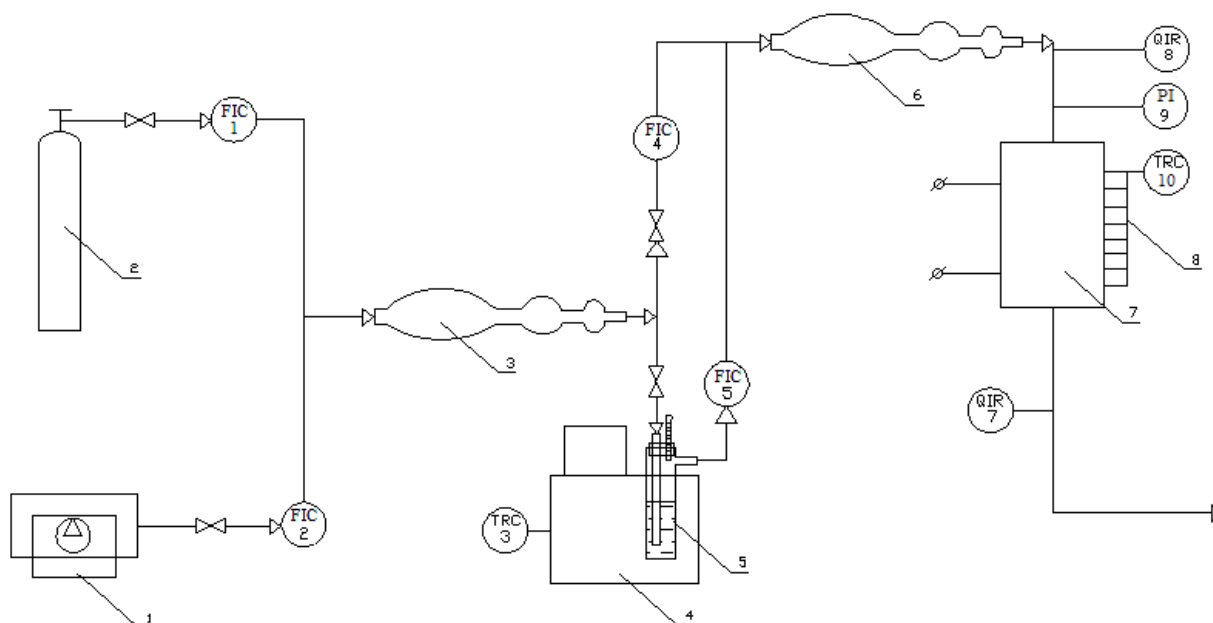


Рисунок 1 – Стенд вивчення кінетичних і газодинамічних параметрів гетерогенно-каталітичних процесів:

1 – компресор; 2 – балони для подачі газів; 3, 6 – змішувачі, 4 – термостат;
5 – посудина з одним з рідких вуглеводнів; 7 – обігрівається теплоізолюваний реактор; 8 – термопари

У такому реакторі легко здійснюється регулювання температур газів за його довжині в разі потреби підтримки ізотермічного режиму; проведення досліджень розподілу температур газу для проведення процесу конверсії в адіабатичному режимі; одночасна фіксація концентрацій вихідних речовин і продуктів реакції каталітичної конверсії в довжині реактора. Крім цього конструкція реактора (рис. 2) дозволяє проводити дослідження температурного поля реакційного газу в реальному часі, що дає можливість знизити інерційних вимірювання температури. Розміщення термопар на поверхні, всередині зерна каталізатора і в потоці газу створює передумови для фіксації температурних явищ розігріву каталізатора при протіканні екзотермічних процесів.

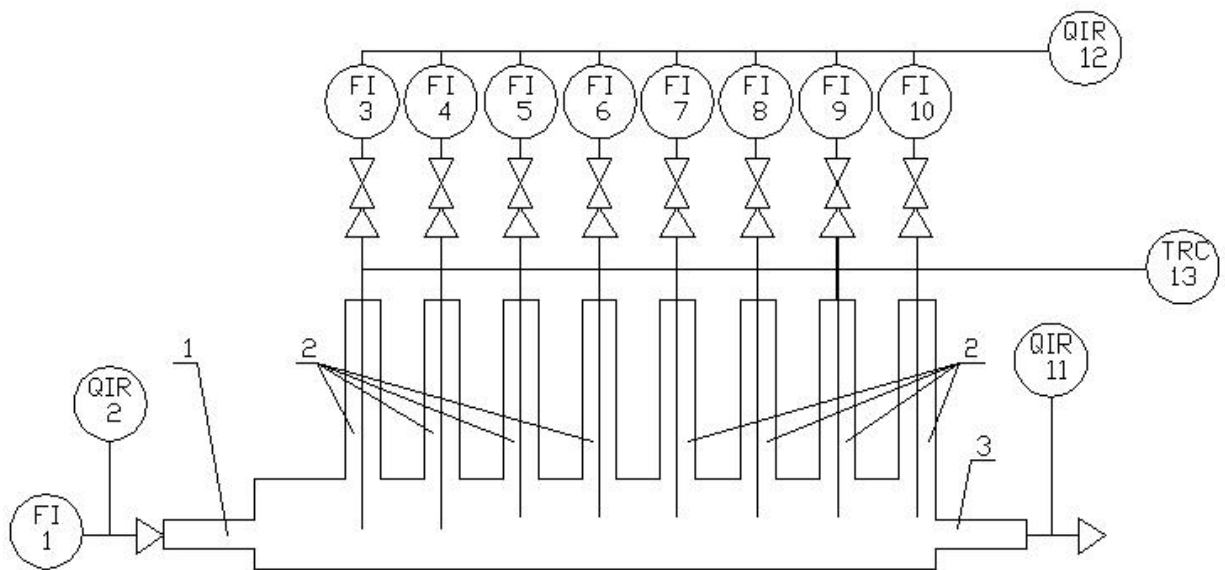


Рисунок 2 – Проточний реактори диференціального типу

1 і 3 – штуцери подачі-виводу газу і завантаження-вивантаження каталізатора;
2 – пробовідбірники

3. Кінетичні закономірності гетерогенно-каталітичного процесу

Для опису гетерогенно-каталітичного процесу застосовано наступний підхід. З одного боку процес перебігає через низку фізичних стадій – дифузію реагентів до поверхні каталізатора, адсорбцію, власне хімічне перетворення, десорбцію продуктів реакції, дифузію продуктів хімічного перетворення у ядро газового потоку. А з іншого – процес є ускладненим хімічною взаємодією бензену з киснем у ядрі потоку, яке відбувається за радикальним механізмом [5, 6]. Тому загальне кінцеве рівняння кінетики процесу конверсії бензену буде містити у своєму складі як компоненти, що відповідають за швидкість поверхневої реакції на каталізаторі, так і компоненти, що відповідають за швидкість хімічної реакції у ядрі газового потоку за радикальним механізмом.

Початкова конвертована газова суміш містить кисень у значному надлишку, тому використання кінетичного рівняння мономолекулярного хімічного перетворення бензену першого порядку у діоксид вуглецю є виправданим і має наступний вигляд [7]

$$-\frac{dn}{F_{\text{катл}} d\tau} = k_{\text{пов}} C_{\text{пов}}, \quad (1)$$

де $F_{\text{катл}}$ – площа поверхні носія, вкрита каталітично активними сполуками, м^2 ; n – кількість речовини бензену, моль; τ – час контакту, с; $k_{\text{пов}}$ – поверхнева константа швидкості перетворення бензену у CO_2 , с^{-1} ; $C_{\text{пов}}$ – поверхнева концентрація бензену, моль/ м^2 .

Для того, щоб пов'язати поверхневу та об'ємну концентрації бензену використовуємо рівняння ізотерми адсорбції, яка у нашому випадку має вигляд рівняння ізотерми адсорбції Генрі. Це впливає з того факту, що початкова газова суміш містить кисень у значному надлишку щодо бензену, а поверхню каталітичного перетворювача вважаємо однорідною [8].

$$C_{\text{пов}} = \Gamma C_{\text{об}}, \quad (2)$$

де Γ – константа Генрі, м; $C_{\text{об}}$ – об'ємна концентрація бензену, моль/ м^3 .

З іншого боку загальна кількість речовини бензену n у реакторі пов'язана з об'ємною концентрацією бензену наступним чином

$$n = VC_{\text{об}}, \quad (3)$$

де V – об'єм реактора, м^3 .

Очевидно, що із збільшенням вмісту каталітично активних сполук на поверхні носія, збільшується і швидкість хімічної реакції на поверхні каталітичного перетворювача. З іншого боку не вся поверхня носія вкрита каталітично активними сполуками. Для врахування цих обставин загальна поверхня носія каталізатора F , м^2 , та поверхня носія, що вкрита каталітично активними сполуками $F_{\text{катл}}$, м^2 , пов'язані наступним співвідношеннями [56]

$$F_{\text{катл}} = FC_{\text{катл}}^a, \quad (4)$$

де $C_{\text{катл}}$ – поверхнева концентрація каталітично активних сполук, $\text{кг}/\text{м}^2$; a – константа.

Після підставлення рівнянь (2) – (4) у рівняння (1) отримаємо

$$-\frac{dC_{об}}{d\tau} = \frac{F}{V} \Gamma C_{кпл}^a k_{нов} C_{об}. \quad (5)$$

Рівняння (2) описує гетерогенно-каталітичний процес, що ізолювано перебігає на поверхні каталізатора, і не враховує тієї обставини, що частина бензену перетворюється на діоксид вуглецю у ядрі газового потоку у хімічній реакції радикального типу [9, 10]. На швидкість перебігу радикальної реакції у ядрі газового потоку впливають додатково такі чинники, як концентрація бензену у потоці, структура потоку та інтенсивність його перемішування. Урахування цих чинників дозволяє отримати рівняння швидкості перетворення бензену на карбон (IV) оксид, яке враховує об'ємну та поверхневу компоненти

$$-\frac{dC_{об}}{d\tau} = \frac{F}{V} k C_{кпл}^a C_{об}^b C_0^c Re^c, \quad (6)$$

де k – спостережувана константа швидкості ($k = \Gamma k_{нов}$), м/с; C_0 – початкова концентрація бензену, моль/м³; Re – критерій Рейнольдса; b і c – константи.

Інтегрування рівняння (6) від $C_{об0}$ до $C_{об}$ та від 0 до τ дозволяє отримати залежність ступеня конверсії бензену від параметрів перебігу гетерогенно-каталітичного процесу.

$$X = 1 - \exp\left(-\tau_0 \frac{T_0}{T} k_0 \frac{F}{V} C_{кпл}^a C_0^b Re^c \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)\right), \quad (7)$$

де E – спостережувана енергія активації, Дж/моль; k_0 – передекспонентний множник, м/с; R – універсальна газова стала, Дж/К·моль; τ_0 – час контакту, приведений до нормальних умов, с; T – поточна температура у зоні реакції, К; T_0 – температура, до якої приведений час контакту τ_0 , К.

Рівняння (7) у логарифмічній формі має наступний вигляд

$$\ln \left(\frac{\ln(1-X)}{-\tau_0 \frac{T_0}{T} \frac{F}{V} C_{ктл}^a C_0^b Re^c} \right) = \ln k_0 - \frac{E}{RT}. \quad (8)$$

Для випадку, коли не враховується об'ємна компонента гетерогенно-каталітичного процесу або $C_{ктл}$, C_0 та Re є незмінними впродовж експерименту чи серії експериментів, рівняння (8) може бути представлено так

$$\ln \left(\frac{\ln(1-X)}{-\tau_0 \frac{T_0}{T}} \right) = \ln k_0 - \frac{E}{RT}. \quad (9)$$

Підстановка у рівняння (9) експериментальних даних дозволяє швидко визначити графічним методом (рис. 3) [7, 11] температуру переходу процесу конверсії бензену із кінетичної у зовнішньодифузійну область – Θ , а також спостережувані значення енергії активації $E = -Rtg(\alpha)$ та передекспонентного множника k_0 для окремого експерименту.

Отримані значення енергії активації E і передекспонентного множника k_0 дозволяють за допомогою рівняння (9) отримати розрахункову залежність ступеня конверсії від температури для окремого експерименту (рис. 4).

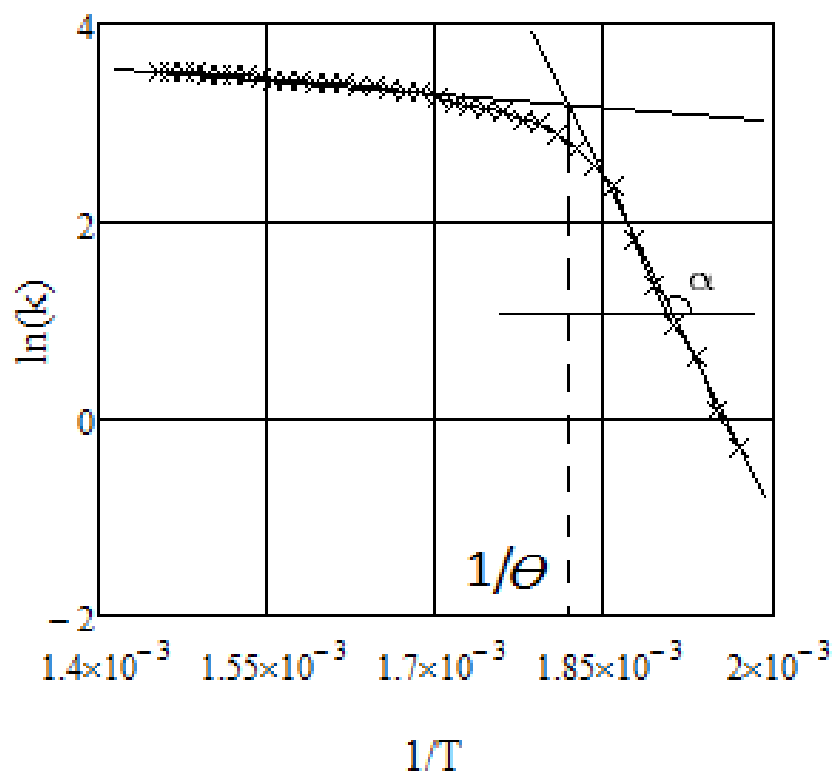


Рисунок 3 – Залежність логарифма константи швидкості процесу конверсії бензену від оберненої температури

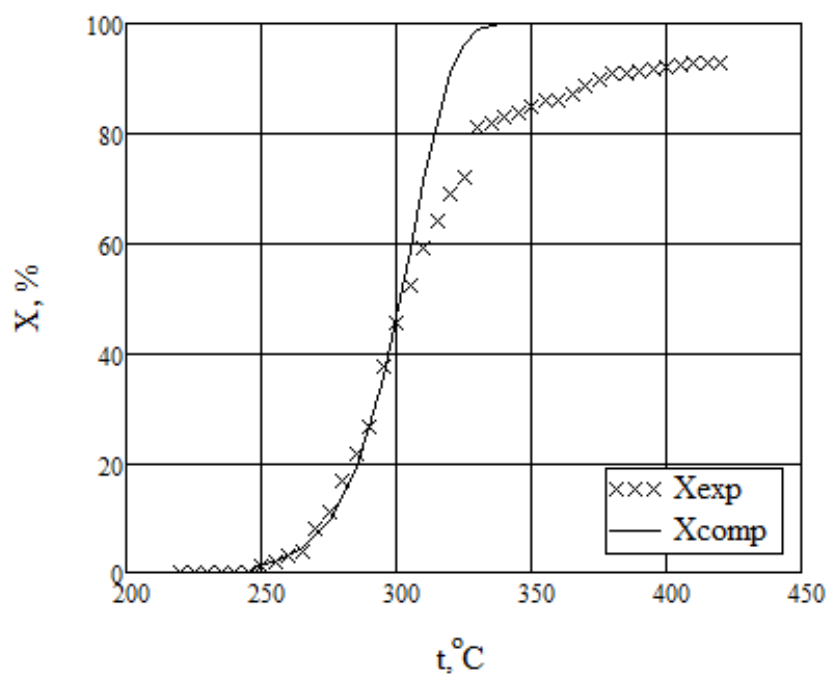


Рисунок 4 – Розрахована X_{comp} та експериментальна X_{exp} залежності ступеня конверсії бензену від температури

4. Методика проведення роботи

Увімкнути газоаналізатор Инфракар 5М-2.02 щонайменше за півгодини до початку проведення вимірювань. Заповнити за необхідності посудину для рідких вуглеводнів (барботер) 5 бенzenом чи іншим летким реагентом та зважити її на аналітичних терезах m_1 , кг. Під'єднати барботер до стенду.

Увімкнути компресор 1 одночасно увімкнути секундомір для визначення часу проходження повітря через барботер (τ , с) та виставити за допомогою регулювальних вентилів швидкість повітря через барботер $V_1=8$ л/год, а через змішувач $V_2=6.5$ л/хв. Вставити термопари у шостий та восьмий пробовідбірники реактора, які вимірюють температури T та T_1 відповідно, та під'єднати їх до електронного термометра. Увімкнути автотрансформатор, поступово піднімати напругу так, щоб швидкість зростання температури не перевищувала 0.5 °С/с.

Початком гетерогенно-каталітичного процесу слід вважати температуру, при якій спостерігається стійке показання газоаналізатора Инфракар 5М-2.02 по об'ємній частці CO_2 , % на рівні $\phi=0.01\%$. Гетерогенно-каталітичний процес починається при температурі T від 250 до 270 °С. Після початку гетерогенно-каталітичного процесу слід записувати значення об'ємної частки CO_2 кожні 5 °С. Дослідження слід припинити при досягненні температури T $350..370$ °С.

По закінченні вимірювань слід:

- від'єднати Инфракар 5М-2.02 від дослідного стенду, продути і вимкнути газоаналізатор;
- вимкнути автотрансформатор;
- вимкнути компресор та завершити вимірювання часу проходження повітря через барботер (τ , с);
- зважити барботер із летким реагентом на аналітичних терезах m_2 , кг.

Отримані під час вимірювань дані об'ємної частки CO_2 , %, відповідні значення температури T , °С та час проходження повітря через барботер τ , с занести у табл. 1.

5. Обробка експериментальних даних

1. Визначити масу леткого реагенту, який випарувався під час експерименту, кг

$$m = m_1 - m_2. \quad (10)$$

2. Визначити об'єм повітря, який пройшов через реактор V , м³

$$V = \left(\frac{V_1 \tau}{3600} + \frac{V_2 \tau}{60} \right) / 1000. \quad (11)$$

3. Визначити час проходження газової суміші через шар каталізатору, приведений до нормальних умов, τ_0 , с (об'ємом каталізатору можна знехтувати)

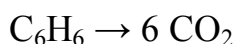
$$\tau_0 = \frac{V_r}{\left(\frac{V_1}{3600} + \frac{V_2}{60} \right) / 1000}. \quad (12)$$

де V_r – об'єм зони реактора, заповненої шаром каталізатора, що дорівнює $7,85 \times 10^{-6}$ м³

4. Визначити концентрацію леткого реагенту, який водить у реактор C_0 , кг/м³

$$C_0 = m / V. \quad (13)$$

5. Визначити об'ємну частку CO₂, %, яка відповідає повному ($X=100\%$) каталітичному перетворенню леткого органічного реагенту Φ , %. Під час цих розрахунків зміною реакційного об'єму внаслідок хімічного перетворення нехтують. Приклад розрахунку Φ , % для бензену.



Молекулярна маса бензену $M(\text{C}_6\text{H}_6) = 78,0$ г/моль.

Молярний об'єм ідеального газу $V_m = 22,4$ л/моль.

У одному кубічному метрі газу, що входить у реактор, знаходиться $m(C_6H_6)$ кг бензену

$$m(C_6H_6) = 1 \cdot C_0. \quad (14)$$

Під час повного каталітичного перетворення $m(C_6H_6)$ кг бензену у карбон (IV) оксид утворюється об'єм останнього $V(CO_2)$, л

$$V(CO_2) = 6V_m \frac{m(C_6H_6)}{M(C_6H_6)}. \quad (15)$$

Об'ємна частка CO_2 , %, яка відповідає повному ($X = 100$ %) каталітичному перетворенню леткого органічного реагенту Φ , %

$$\Phi = \frac{V(CO_2)}{1000} 100\%. \quad (16)$$

6. Визначення ступеня перетворення X леткого вуглеводню у карбон (IV) оксид для кожного значення температури T

$$X = \frac{\varphi}{\Phi}. \quad (17)$$

7. Побудувати графік залежності ступеня перетворення X леткого вуглеводню у карбон (IV) оксид від температури T .

8. Розрахувати ліву частину рівняння 9, яка являє собою логарифм константи швидкості гетерогенно-каталітичного процесу $\ln(k)$.

9. Використовуючи рівняння 9, побудувати графік залежності логарифму спостережуваної константи швидкості від оберненої температури, як показано на рис. 3 і визначити графічним методом значення температури переходу гетерогенно-каталітичного процесу із кінетичної у зовнішньодифузійну область – Θ . Спостережувані значення енергії активації E та пе-

редекспонентного множника k_0 визначаються графічним методом, як показано на рис. 3, або за допомогою методу найменших квадратів.

Для визначення температури переходу гетерогенно-каталітичного процесу із кінетичної у зовнішньодифузійну область Θ , K проводять дотичні до низькотемпературної та високотемпературної ділянок залежності $\ln(k)=f(1/T)$. Абсциса точки перетину дотичних є оберненим значенням температури переходу процесу із кінетичної у зовнішньодифузійну область $1/\Theta$, $1/K$.

Графічний метод визначення спостережуваних значень енергії активації та передекспонентного множника.

Передекспонентний множник k_0 визначають як експоненту значення відрізка вісі ординат, що відтинається дотичною, проведеною до низькотемпературної ділянки залежності $\ln(k)=f(1/T)$

$$k_0 = \exp(A), \quad (18)$$

де A – значення відрізка вісі ординат у масштабі побудови графіка, що відтинається дотичною, проведеною до низькотемпературної ділянки залежності $\ln(k)=f(1/T)$

Спостережуване значення енергії активації E визначається наступним чином

$$E = -Rtg(\alpha). \quad (19)$$

Визначення спостережуваних значень енергії активації та передекспонентного множника методом найменших квадратів.

Для перших $N = 7 - 10$ точок експериментальних даних (низькотемпературна область) графічної залежності $\ln(k)=f(1/T)$ проводять наступні обчислення.

$$\ln(k_0) = \frac{\sum_N \ln(k_i) \cdot \sum_N (1/T_i)^2 - \left(\sum_N (\ln(k_i) \cdot (1/T_i)) \right) \cdot \sum_N (1/T_i)}{N \sum_N (1/T_i)^2 - \left(\sum_N (1/T_i) \right)^2}. \quad (20)$$

$$k_0 = \exp(\ln(k_0)) . \quad (21)$$

$$tg(\alpha) = \frac{N \left(\sum_N (\ln(k_i) \cdot (1/T_i)) \right) - \sum_N \ln(k_i) \cdot \sum_N (1/T_i)}{N \sum_N (1/T_i)^2 - \left(\sum_N (1/T_i) \right)^2} . \quad (22)$$

$$E = -Rtg(\alpha) . \quad (22)$$

10. Визначити розраховані значення ступеня перетворення X_{comp} леткого вуглеводню у карбон (IV) оксид для кожного значення температури T та нанести отримані дані на графік залежності ступеня перетворення від температури.

$$X_{comp} = 1 - \exp \left(-\tau_0 \frac{T_0}{T} k_0 \exp \left(-\frac{E}{RT} \right) \right) . \quad (23)$$

11. Заповнити таблиці експериментальних даних та оформити висновки за результатами отриманих у роботі даних та відомостей про перебіг гетерогенно-каталітичного процесу.

Таблиця 1 – Експериментальні та розраховані дані.

Маса барботеру із летким вуглеводнем до експерименту m_1 , кг			
Маса барботеру із летким вуглеводнем після експерименту m_2 , кг			
Час барботажу τ , с			
Т, К	$\varphi(\text{CO}_2)$, %	X	X_{comp}

6. Контрольні питання

1. Порядок проведення досліджень та аналіз отриманих результатів.
2. Що таке каталіз та каталізатори? Поняття інгібітора.
3. Стадії гетерогенно-каталітичних процесів.
4. Що таке лімітуюча стадія процесу, як вона визначається для гетерогенно-каталітичних процесів?
5. Чи можна багатостадійний гетерогенно-каталітичний процес описувати за допомогою рівнянь формальної кінетики як процес мономолекулярної реакції першого порядку, чому і як саме?
6. Фактори інтенсифікації гетерогенно-каталітичних процесів.
7. Що таке енергія активації та одиниці її вимірювання.
8. У чому відмінність між дійсною та спостережуваною (фіктивною) енергією активації?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Robert E. Treybal. Mass Transfer Operations / Robert E. Treybal. – New York: McGraw-Hill, 1980. – 786 p.
2. Разработка и испытание гранулированных катализаторов для камер сгорания газотурбинных установок регенерационного цикла / З.Р. Исмагилов, Н.В. Шикина, С.А. Яшник и др. // Кинетика и катализ. – 2008. – Т.49. – №6. – С. 922-935.
3. Соловьев Г.И. Каталитический нейтрализатор с металловолоконистым катализатором для очистки выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания / Г.И. Соловьев, А.А. Климаш, В.В. Гончаров // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2008. – №5. – С. 44-49.
4. Крылов О.В. Каталитическая очистка выхлопных газов автомобильного транспорта. По материалам VII международного конгресса по катализу и очистке автомобильных газов / О.В. Крылов, В.Ф. Третьяков // Катализ в промышленности. – 2007. – №4. – С. 44-54.
5. Spalding D.B. Combustion and mass transfer: a textbook with multiple-choice exercises for engineering students / D.B. Spalding. – New York.: Pergamon Press, 1979. – 409 p.
6. Пашков Л.Т. Основы теории горения: учебное пособие / Л.Т. Пашков. – М.: «Издательский дом МЭИ», 2002. – 134 с.
7. Levenspiel O. Chemical reaction engineering / Octave Levenspiel – New York: John Wiley & Sons, Inc., 1999. – 684 p.
8. Стромберг А.Г. Физическая химия / А.Г. Стромберг, Д.П. Семченко. – М.: Высшая школа, 2001. – 527 с.
9. Воинов А.Н. Сгорание в быстроходных поршневых двигателях / А.Н. Воинов. – М.: Машиностроение, 1977. – 277 с.
10. Термическое разложение и горение взрывчатых веществ и порохов [Текст] / Г.Б. Манелис, Г.М. Назин, Ю.И. Рубцов, В.А. Струнин. – М.: Наука, 1996. – 223 с.
11. Снаговский Ю.С., Островский Г.М. Моделирование кинетики гетерогенных каталитических процессов / Ю.С. Снаговский, Г.М. Островский. – М.: Химия, 1976. – 248 с.

Навчальне видання

Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи «Дослідження гетерогенно-каталітичного процесу, що лімітується зовнішньою кінети-кою» з курсу «Загальна хімічна технологія» для студентів хімічних спеціальностей усіх форм навчання.

Укладачі: ВЕДЬ Валерій Євгенович

КРАСНОКУТСЬКИЙ Євген Володимирович

МІРОШНІЧЕНКО Наталія Миколаївна та ін.

Відповідальний за випуск В.Є.Ведь

Роботу рекомендував до друку О.М. Рассоха

В авторській редакції

План 2015 р. поз. 166

Підп. до друку 18.05.2015 р. Формат 60х84 1/16. Папір офсетний.

Riso-друк. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк.

Наклад 50 прим. Зам. № Ціна договірна

Видавничий центр НТУ «ХПІ».

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 3657 від 24.12.2009 р.

61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

Друкарня